

大河千弘と核融合研究 III

History of Tihiro Ohkawa's nuclear fusion research in 1960s-1970s III

○雨宮高久¹*Takahisa Amemiya¹

Abstract: Tihiro Ohkawa is the most famous researcher among Japanese nuclear fusion ones. Ohkawa and Gulf General Atomic nuclear fusion research group constructed the DC Octopole device around 1968-69. This machine was built to determine whether the confinement limit of a few tens of Bohm diffusion times observed in devices in 1960's represented an absolute upper limit on confinement time. The plasma confinement time in the DC Octopole was 300 times longer than the Bohm time in 1969's experiments. In addition, classical diffusion in a toroidal device was observed for the first time. These results were presented at International Symposium on Closed Confinement system in 1969 by Ohkawa, M. Yoshikawa, R. Kribel and A.A. Schupp. After that, in order to see toroidal effects on the diffusion, a toroidal magnetic field was added to the device. Therefore, neoclassical diffusion was observed and this experimental result was verified the neoclassical theory for the first time. In the 1970s, DC Octopole was used in experiments investigating the behavior of Ohmic heating discharge in a noncircular cross-section tokamak field with poroidal diverters and the effects of rf heating of ions on plasma confinement etc.

1. 本発表の背景と目的

前回の日本大学理工学部学術講演会では、大河千弘を中心とした General Atomic 社(当時は Gulf General Atomic Com.)における 1960 年代のプラズマ・核融合研究開発の動向、主として電磁誘導型内部導体系装置による研究開発史について報告した。同調査から、この時期の大河ら GGA 核融合研究グループの関心は、主として内部導体系装置を用いたプラズマ物理学の解明に向けられていたことが判明した。

本発表では、前回の報告に引き続き、GGA での直流八極磁場装置(DC Octopole)に関する研究の動向について、文献史料および 2009 年に行った大河氏へのインタビュー記録に基づく調査結果を報告する。

2. 直流八極磁場装置(DC Octopole)

直流八極磁場装置(DC Octopole)は、1968 年から 69 年にかけて、GGA の核融合研究グループによって設計、建造された内部導体系プラズマ・核融合実験装置である。磁場配位には、先の実験において Quadrupole 配位で観測された擾乱を避けるために、Octopole 配位が採用された。DC Octopole 内には 6 本の多極磁場用電流環(内部導体)が存在し、Octopole 磁場(ポロイダル磁場)は、その内の 4 本の内部導体によって生成され、残りの 2 本は帰還電流(return current)を流すために利用された。なお、それぞれの電流環は 3 本の支持棒によって固定されており、その内の 1 本は同軸電流を供給する役割も果たした。プラズマ容積は約 $1 \times 10^7 \text{ cm}^3$ 、支持棒の全表面積はおおよそ 10^2 cm^2 で、内部導体や支持棒を包含したトロイダル真空容器は、直径 16ft (約 4.86m)、高さ 8ft (約 2.43m)、Octopole 主半径 1.42m という装置内に人が入れる位の大きさで、装置の写真を見たロシア人は“The machine”と称したという。同装置の直流電源は、Doublet-II でも使用された海軍の蓄電池が使用され、生成された最大磁場は Octopole 軸上で $4.5 \times 10^2 \text{ Wb/m}^2$ に達した。DC Octopole に対するプラズマ源としては、当初は同軸プラズマ銃により供給される水素や

ヘリウムのプラズマが使用されたが、1975 年頃になると、中性粒子の background pressure を避けるために、レーザーによって生成されたリチウムプラズマも実験の中で用いられた。プラズマ密度や電子温度などの各パラメータの計測には、マイクロ波干渉計や Langmuir 探針、グリッド静電探針等が使用された。

3. DC Octopole による GGA のプラズマ・核融合研究

3-1. プラズマ閉じ込め時間の更新

DC Octopole における実験において、先ず取り上げられる主要な成果は、プラズマ閉じ込め時間の更新である。先の実験で使用された電磁誘導型内部導体系装置で観測された閉じ込め時間は、支持棒損失のために Bohm 時間の 10~50 倍に制限されていた。これが絶対的上限であるかを確認することが、DC Octopole の当初の目的であった。実験の結果、閉じ込め時間は 0.06sec で、Bohm 時間の 300 倍に達した。DC Octopole が以前の装置と比べて長い閉じ込め時間を実験で提示できた理由としては、(1)支持棒の表面積に対するプラズマ容積の比を増加させたことによって、支持棒損失が減少した事や(2)平均極小磁場配位の磁気流体力学(MHD)的安定性、(3)連結距離が短い Octopole 配位を採用した事、さらに、(4)誤差磁場を最小にする事への配慮や(5)誘導トロイダル電場を除去した事などが挙げられる。

同成果は、1969 年 9 月 29 日に旧ソ連 Dubna で開催された International Symposium on Closed Confinement System で報告され、雑誌 Physics Today には同会議での大河らの発表をソ連の L.A. Artsimovich によるトカマク T-3 の成果と対比させて、“Cold Octopole and Hot Tokamak Show Long Confinement Time”という表題で報告がなされた。同報告では、トカマクと比較して低温・低密度である DC Octopole が長い閉じ込め時間を提示したことを“核融合炉に適した磁場配位に関する知識を与えるもの”として称賛している。

3-2. 古典拡散・新古典拡散の観測

DC Octopole でのもう一つの主要な成果として挙げ

られるのが、古典拡散と新古典拡散を観測したことである。古典拡散は、上記した 1969 年の DC Octopole における初期の実験で観測された。高密度($n > 2 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$)の状態において、観測されたプラズマ密度と時間の関係を見ると、(1)プラズマ密度は時間の逆数 $1/t$ で減衰し、(2)観測された損失はリミッターによるものが支配的で、plasma loss flux は $1/t^2$ の関数として変化した。また、(3)観測された密度減衰定数の逆数($n\tau$)⁻¹ とリミッターによる loss flux は、 $1/B^2$ に比例するという結果も確認された。この実験結果と磁束線に沿ったプラズマ輸送方程式を用いた理論的解析を考慮し、大河らは「高密度下での拡散過程は古典拡散理論と一致している」という結論を導いた。その後、さらに詳細な分析が行われ、密度の空間分布と時間依存性、イオン質量の衝突拡散係数への依存性、拡散係数の理論値との比較によって、実験誤差の範囲内で古典拡散が引き起されていることが確認された。

その後、DC Octopole には真空容器の外側に 36 回巻きのトロイダルソレノイドコイルが設置され、トロイダル磁場が付加された磁場配位での実験が行われるようになった。トロイダル磁場、ポロイダル磁場ともに独立に調整が可能で、どちらも数百 G の磁場を生成する事が出来た。この磁場配位において、支持棒や再結合による損失は少なく、支配的な損失は拡散によるものであった。実験の結果、測定された密度減少率と平均自由行程の関係から、拡散による密度の減衰に対して 3 つの主な領域が観測された。実験開始当初、プラズマ密度の逆数 n^{-1} は時間変化に対して線形依存性を示し、拡散係数 D は密度 n に比例する Pfirsh-Schlüter 効果に基づく拡散が観測された。その後、プラズマ密度が次第に減少する事で衝突平均自由行程が長くなり、平均自由行程が装置の主半径に近づくと、減衰はほぼ指数関数状になった。さらに平均自由行程が装置の主半径を超えると、再び拡散係数が密度に比例するようになった。詳しい測定の結果、 $n\tau$ (τ : 閉じ込め時間)が磁場の 2 乗と電子温度の平方根に比例する事が確認された。また、低密度でのプラズマ減少率はトロイダル磁場がない場合の密度減少率に近い事も判明した。これらの実験結果と解析から、大河らは観測された拡散を新古典拡散である事を確認するに至った(1971 年)。

3-3. ポロイダルボーム拡散の観測

DC Octopole の実験では、古典拡散や新古典拡散のほかにも、無衝突領域中において“ポロイダルボーム拡散”が観測された。同装置における無衝突領域での実験において、3 つのタイプの拡散が観測された。その内の 2 つは、低温($T_e < 0.5 \text{ eV}$)、低磁場中で生じる新古典拡散とプラズマ誘電率が小さい時に生じる熱的ゆらぎによる拡散であった。そして、電子温度が 0.5 eV 以上に加熱される時に、第 3 の拡散モードとして生じたのが“ポロイダルボーム拡散”である。“ポロイダルボーム拡散”という名称は、拡散が全磁場ではなくポロイダル磁場の強さに依存することを除いて、スケーリ

ングがボーム拡散と類似している事に由来しており、このモードでのプラズマ閉じ込め時間は、電子温度の逆数とポロイダル磁場の大きさに比例するが、プラズマ密度やトロイダル磁場の大きさには依存していない事が判明した($\tau \propto B_p/T$)。

以上の実験結果は、1974 年 11 月に東京で開催された Fifth International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research において報告され、その中で大河らは、ポロイダルボーム拡散の原因を「捕捉電子の存在による弱い乱れ」であると考察し、DC Octopole におけるプラズマ閉じ込め時間が“ポロイダルボーム時間”の 500~1000 倍になること、さらに同拡散がトカマクやスフェレータの実験でも観測されていたことを提示した。

3-4. トカマク-ダイバータ配位による実験

1970 年代に入ると、拡散過程の研究に加えて、DC Octopole の磁場配位を将来の核融合炉の配位候補の 1 つとして考えられていた非円型断面トカマクの磁場配位に変形した上で実験を行う事が計画された。同配位形成には、弱い Octopole 磁場と強いトロイダル磁場の混合磁場中に強いトロイダルプラズマ電流を付加する方法が用いられた。その結果、Octopole 軸付近でのプラズマ電流のために、軸付近に閉じた磁気面が形成され、セパトリックス外側の磁気面は軸対称ダイバータ磁気面と同様の形状となった。

実験では、同配位における磁気流体力学(MHD)的平衡とプラズマの安定性が課題とされた。同実験の結果は電力研究所(EPRI)レポート(1975 年)の中で初めて報告され、上記磁場配位では安定なプラズマ平衡は確認されたが、安全係数 $q=1$ の面が電流密度勾配の大きな磁気面に近付くと、電流崩壊不安定性が観測され、同不安定性はセパトリックス境界面上で q が発散するために、安定化は困難であると結論された。

4. 本発表の総括

DC Octopole ではこの他にも、レーザー集光照射によって生成されたリチウムプラズマを用いて、領域 $T_i \sim T_e$, $\lambda_{ei} \sim \lambda_{ie} > R$ における拡散の研究やプラズマ閉じ込めに対する RF 加熱の効果についての検証が 1975 年頃にかけて行われた。DC Octopole 実験の当初の目的は、プラズマ閉じ込め時間の更新であり、これについては早々に達成したと言える。その後は、拡散過程の研究、そして軸対称トカマク-ダイバータ配位の MHD 平衡と安定性の研究や RF 加熱の検証などが行われた。

1970 年代から開始された DC Octopole の研究課題を見ると、それらは 1972 年から建造、実験が開始された非円型断面トカマクである装置 Doublet-II との関連性が伺える。よって、以上の事から DC Octopole による研究は、当初プラズマ閉じ込め時間や拡散過程の研究といったプラズマ物理学の研究を主目的としていたが、Doublet による研究開始に伴い、同研究を支援する核融合炉工学へとその目的が変化すると推察される。